

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

УДК 664 (075.8)

Білонога Ю.Л.

ПРО ДОЦІЛЬНІСТЬ РОЗГЛЯДУ ГІДРОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ
З УРАХУВАННЯМ СИЛ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ НА ГРАНИЦІ КОНТАКТУ
ТВЕРДЕ ТІЛО-РІДИНА

Львівська національна академія ветеринарної медицини імені С.З. Гжицького

Відомо, що в турбулентних (Т) потоках рідини, що межує з твердим тілом (потік-стінка трубопроводу, частинка-потік при осадженні, рідина у фільтрувальній перегородці) виникає приграничний ламінарний (Л) шар [1]. Нами зазначалося [2,3], що на межі розділу двох фаз рідина-тверде тіло (Р-ТТ) виникає потужне поле сил поверхневого натягу, що змінює потік рідини з утворенням Л приграничного шару. В капілярах це явище відслідковується дуже наглядно, оскільки малий діаметр капіляру створює замкнутий простір в межах дії сил поверхневого натягу, і при цьому маємо цілу низку капілярних явищ, що базуються на існуванні капілярного тиску та гідрофільності поверхні змочування. Розглянемо елементарний об'єм рідини, наприклад, в трубопроводі в межах Л приграничного шару (рис. 1). На елементарний об'єм діють сили:

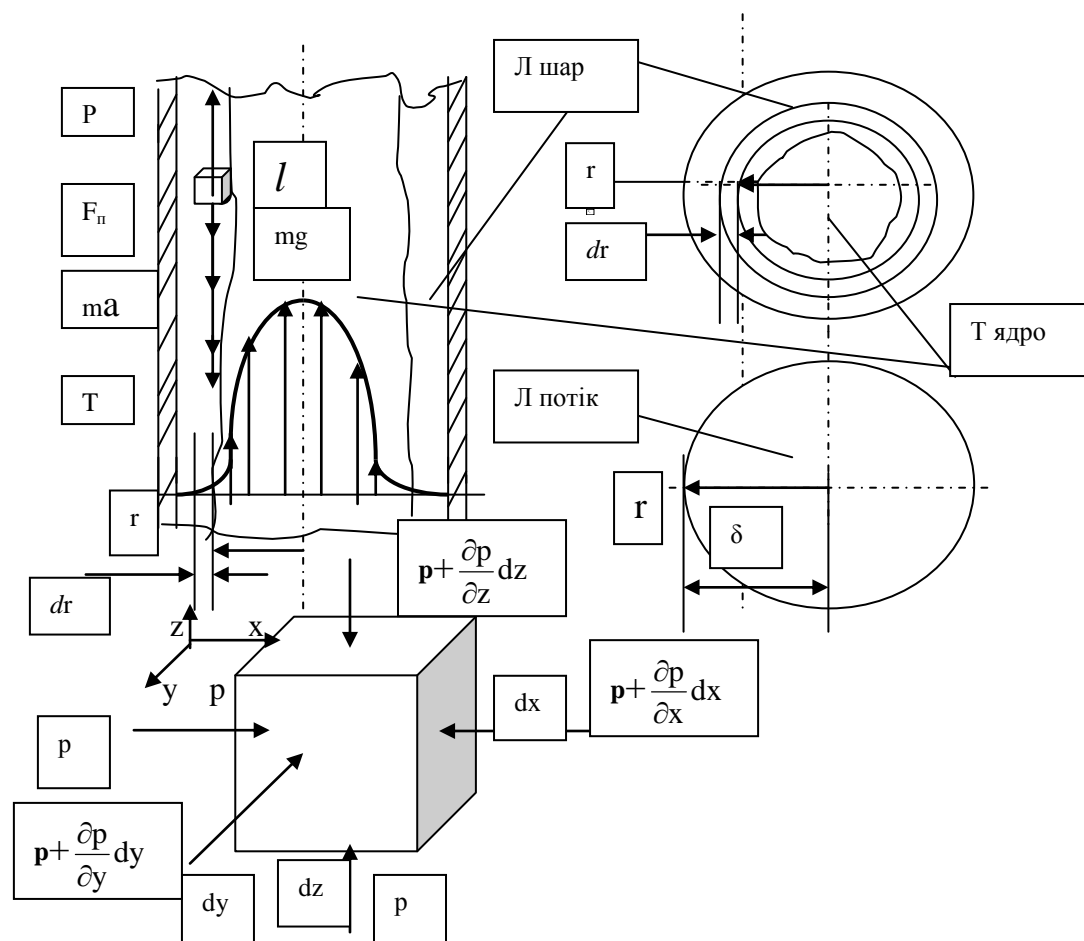


Рисунок 1 – Схема силового поля, що діє на елементарний об'єм рідини в Л шарі на межі потік – стінка трубопроводу

1. Сила поверхневого натягу рідини: $F_n = 2\pi(dx)\sigma \cdot \cos\theta$; 2. Сила тяжіння: $mg = \rho \cdot g(dx dy dz)$; 3. Сила тертя: $T = \mu \frac{d^2 V_x}{dx^2}(dx dy dz)$; 4. Сила інерції:

$$F_i = ma = \rho \cdot \frac{dV_z}{d\tau}(dx dy dz); 5. \text{ Сила тиску: } P = - \frac{dp}{dz}(dx dy dz),$$

де p – тиск рідини, що діє на верхню грань елементарного об'єму, Па;

$P_1 = p(dx dy)$ – сила тиску, що діє на верхню грань елементарного об'єму, Н;

$p + \frac{dp}{dz} dz$ – тиск, що діє на нижню грань елементарного об'єму, Па;

$P_2 = (p + \frac{dp}{dz} dz)(dx dy)$ – сила тиску, що діє на нижню грань елементарного об'єму, Н;

$P = P_1 - P_2 = p(dx dy) - (p + \frac{dp}{dz} dz)(dx dy) = - \frac{dp}{dz}(dx dy dz)$ – сила тиску, що діє на елементарний об'єм, Н;

T – сила тертя, віднесена до одиниці поверхні, Н/м²;

$T(dx dy)$ – сила тертя, що діє на грань елементарного об'єму, Н;

$(T + \frac{dT}{dy} dy)(dx dy)$ – сила тертя, що діє на протилежну грань елементарного об'єму, і співпадає з напрямком його руху, Н;

$R = - T(dy dz) + (T + \frac{dT}{dy} dy)(dy dz) = \frac{dT}{dy}(dx dy dz)$ – результуюча сил тертя, які діють на елементарний об'єм зі сторони рідини, Н;

$T = \mu \frac{dV}{dy}$ – за законом Ньютона, Н; Звідси, $T = \mu \frac{d^2 V_x}{dx^2}(dx dy dz)$;

$F_i = \rho \frac{dV_z}{d\tau}(dx dy dz)$ – сила інерції, Н;

V_x – швидкість в пристінних шарах рідини, м/с; σ – коефіцієнт поверхневого натягу рідини, Н/м; l – лінійний параметр елементарного об'єму, м; ρ – густина рідини, кг/м³; g – прискорення вільного падіння, м/с²; μ – динамічна в'язкість рідини, Па·с; τ – час, с; $\cos\theta$ – поверхнева гідрофільність твердого тіла (стілки трубопроводу).

За принципом Д'Аламбера, алгебраїчна сума всіх сил, що діє на елементарний об'єм, рівна силі інерції. Скорочуючи на $(dx dy dz)$, записуємо співвідношення 1:

$$2\pi(dx)\sigma \cdot \cos\theta / (dx dy dz) + \rho g - \frac{dP}{dz} + \mu \frac{d^2 V_x}{dx^2} = \rho \frac{dV_z}{d\tau} \quad (1)$$

Викреслюємо у цьому диференціальному рівнянні символи диференціювання та напрямку, а лінійні параметри елементарного об'єму dy, dz замінемо на l . $\frac{dV}{dl} \approx \frac{V}{l}$; $\frac{dV}{d\tau} \approx \frac{V}{\tau}$ – виходячи з теорії подібності, враховуючи що швидкість руху рідини а також лінійний параметр l в межах L шару є дуже малими величинами. Поділивши праву та ліву частини рівняння 1 на доданок $\frac{\rho V}{\tau}$, отримуємо:

$$1. \frac{2\pi \cdot \sigma \cdot \cos\theta \cdot \tau}{\rho V \cdot l^2} = \frac{2\pi \cdot \sigma \cdot \cos\theta \cdot \mu}{\rho V^2 \cdot l \cdot \mu} = \frac{1}{N} \frac{2\pi \cdot \sigma \cdot \cos\theta}{\mu V_x} - \text{поверхневий критерій в Л шарі};$$

$$2. \frac{p\tau}{\rho V \cdot l} = \frac{p}{\rho V_x^2} = Eu - \text{критерій Ейлера в Л шарі},$$

$$\text{де } \frac{V}{V_x} = \frac{V_x \delta}{v} = N; \left(\frac{V_x \delta}{v} \right) - \text{видозмінений критерій Рейнольдса, який позначають}$$

$N \approx 10,47-11,5$) [4, с. 94]; V_x – швидкість пристінних шарів рідини, що відповідає напруженню сили тертя на межі рідина-стінка, м/с; (в літературі відома назва “швидкість тертя” динамічна швидкість.

$$3. \frac{\rho g \tau}{\rho V} = \frac{g \tau \cdot l}{V \cdot l} = \frac{g \cdot l}{V_x^2} = Fr - \text{критерій Фруда в Л шарі}.$$

$$4. \frac{\mu V \tau}{l^2 \rho V} = \frac{\mu}{l \cdot \rho V_x} = \frac{1}{Re} - \text{обернений критерій Рейнольдса в Л шарі}.$$

Встановлюємо числовий порядок величин критеріїв, які входять у рівність (1). При цьому в критерії підставляємо характеристики для води за нормальних умов:

$\Delta p \approx 100000$ Па – спад напору по довжині трубопроводу, що дорівнює одній атмосфері; $\rho \approx 1000$ кг/м³ – густина води при нормальних умовах; $V \approx 1$ м/с – середня швидкість руху рідин в трубопроводах на підприємствах харчової, фармацевтичної, переробної промисловості; $V_x \approx V/10 \approx 0,1$ м/с [4, с. 94] – швидкість пристінних шарів рідини, що відповідає напруженню сили тертя на межі рідина – стенка, м/с; $\sigma \approx 0,0725$ Н/м – коефіцієнт поверхневого натягу води при нормальних умовах; $\cos\theta \approx 0,5$ гідрофільність поверхні твердого тіла (стілки трубопроводу); $\mu \approx 1 \cdot 10^{-3}$ Па·с – динамічна в’язкість води при нормальних умовах; $\delta \approx 0,3$ мм. $\approx 0,3 \cdot 10^{-3}$ м. – товщина Л приграничного шару при Т рухові води в трубопроводах.

$$1. \frac{1}{N} \frac{2\pi \cdot \sigma \cdot \cos\theta}{\mu V_x} \approx \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,0725 \cdot 0,5}{10 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1} \approx 227,6; 2. Eu \approx \frac{\Delta p}{\rho V_x^2} \approx \frac{100000}{1000 \cdot (0,1)^2} \approx 10000;$$

$$3. Fr \approx \frac{g \cdot l}{V_x^2} \approx \frac{10 \cdot \delta}{(0,1)^2} \approx \frac{10 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3}}{(0,1)^2} \approx 0,3; 4. \frac{1}{Re} \approx \frac{\mu}{\delta \cdot \rho V_x} \approx \frac{10^{-3}}{0,3 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 \cdot 0,1} \approx 0,0333.$$

Виходячи з наведених розрахунків, в системі елементарний об’єм в Л шарі рідини, що рухається з Т режимом в загальному ядрі потоку, критеріями Фруда та оберненим критерієм Рейнольдса можна нехтувати, оскільки це величини, що 3–5 порядків є меншими від критерію Ейлера та поверхневого критерію в Л шарі. В Л приповерхневій плівці, шар, який безпосередньо контактує з твердим тілом, практично не рухається, а “прилип” до стінки, сили внутрішнього тертя, а значить і динамічна в’язкість, взагалі не проявляються [6, с. 18]. З рівності 1 отримуємо критеріальне рівняння 2:

$$Eu - \frac{2\pi \cdot \sigma \cdot \cos\theta}{\mu V_x} = 1. \quad (2)$$

Нехтуємо також одиницею в критеріальному рівнянні (2). Розглянемо сили тиску і сили поверхневого натягу в Л шарі, що діють на елементарне кільце рідини (рис. 1). Площа елементарного кільця: $dS = 2\pi r dr$; Сила тиску, що діє на елементарне кільце: $dP = p 2\pi r dr$; Сила поверхневого натягу, що діє в Л шарі на елементарне кільце: $dF_{\Pi} = 2\pi \cdot \sigma \cos\theta dr$;

Інтегруємо рівняння, виносячи сталі величини за знак інтегрування:

$$P = \Delta p 2\pi \int_0^{\delta} r dr = \pi \Delta p \cdot \delta^2; \quad F_{\Pi} = 2\pi \sigma \cos\theta \int_0^r dr = 2\pi \sigma \cos\theta \cdot r,$$

де $r = D/2$ – радіус елементарного кільця, м (рис. 1).

Фізичний зміст інтегрування в даній системі полягає в тому, що Л шар сумується по всьому “живому перерізу” трубопровода. Тоді маємо граничний випадок, тобто межу переходу потоку від Л до П режиму, де товщина Л шару δ дорівнює радіусу потоку $r = D/2$ (рис. 1). Після інтегрування, скорочення, прирівнюємо сили, отримуємо формулу (3) [2]:

$$\Delta p \delta^2 = \sigma \cdot \cos\theta D;$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\sigma \cdot D \cos\theta}{\Delta p}}. \quad (3)$$

Формула (3) є справедлива в потоці рідини на межі переходу Л режиму у П, тобто для критичного значення числа Рейнольдса ($Re_{кр.} = 2320$). Для значень критерію Рейнольдса, які більші від критичного, формула (3) записується наступним чином [5]:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sigma D \cos\theta}{\Delta p}} : Re/Re_{кр.}, \quad (4)$$

де $\cos\theta$ – гідрофільність поверхні ТТ; $K_T = Re/Re_{кр.}$ – коефіцієнт турбулізації Л шару; Re – робоче значення критерію Рейнольдса; $Re_{кр.}$ – критичне значення числа Рейнольдса; Δp – спад напору по довжині трубопроводу чи апарату, Па; D – діаметр трубопроводу, м;

Зауважимо, що для граничних умов, коли трубопровід стає капіляром, тобто діаметр D – дуже мала величина, формула (4) переходить у рівність Лапласа при

$$\delta = r = D/2, \quad \frac{D^2}{4} = \frac{\sigma \cdot D \cdot \cos\theta}{\Delta p}; \quad \Delta p = 4\sigma \cos\theta/D. \text{ Очевидно, що в капілярах є Л режим руху}$$

рідини. Тому множник $Re/Re_{кр.} = 1$. Якщо в рівність (4) підставити значення спаду напору по довжині трубопроводу чи апарату з рівняння Дарсі-Вейсбаха, то отримуємо співвідношення (5) [5]:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sigma D \cdot \cos \theta}{\xi \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2}}} : Re/Re_{кр}, \quad (5)$$

де V – середня швидкість руху рідини в трубопроводі чи апараті, м/с; ξ – коефіцієнт Дарсі; ρ – густина рідини, кг/м³; L – довжина трубопроводу, м;

Слід зауважити, що в рівнянні Дарсі-Вейсбаха можуть фігурувати спади напорів на місцевих опорах, тощо. Отже, у формулі (4) Δp – повний спад напору по довжині трубопроводу чи апарату. Враховуючи значення критерія Рейнольда ($Re = \frac{Vd\rho}{\mu}$), співвідношення (5) трансформується у рівність (6):

$$\delta = \sqrt{\frac{2\sigma \cdot \cos \theta \cdot D^4 \rho}{\xi L Re^2 \mu^2}} : Re/Re_{кр}, \quad (6)$$

або у рівність (7):

$$\delta = \frac{D^2}{Re \mu} \sqrt{\frac{2\sigma \cdot \cos \theta \cdot \rho}{\xi L}} : Re/Re_{кр}. \quad (7)$$

Якщо у співвідношення (7) підставити критичне значення числа Рейнольдса $Re_{кр} \approx 2320$, то вона набуває вигляду (8) [5]:

$$\delta = \frac{2320 D^2}{Re^2 \mu} \sqrt{\frac{2\sigma \cdot \cos \theta \cdot \rho}{\xi L}}. \quad (8)$$

Слід зауважити, що отримані нами співвідношення для визначення товщини L приграничного шару в пристінній області на межі потік – стінка суттєво відрізняються від отриманих раніше [4, с. 95, 6, с. 151], оскільки мають фізичні величини, що відповідають за умови контакту фаз ТТ – Р, тобто коефіцієнти поверхневого натягу на межі середовищ та гідрофільність поверхні ТТ. Такий підхід дав нам можливість розраховувати теплові опори в теплообмінниках, враховуючи товщину приграничних L шарів [5] і запропонувати методи підвищення загального коефіцієнта теплопередачі теплообмінників при застосуванні відповідних поверхнево-активних речовин (ПАР) [5,8].

Аналогічний підхід нами запропонований для гідромеханічного процесу осадження [3] (рис. 2). Силове поле, що діє на елементарний об'єм рідини в L шарі при осадженні твердої частинки, є аналогічним до силового поля, що представлене в попередньому випадку, тобто в L шарі на межі потік – стінка трубопроводу з тією різницею, що різниця тисків зумовлена дією сил тяжіння та Архімеда при осадженні, віднесених до площі поверхні півсфери, на яку діє їх результуюча. Поділивши праву та ліву частини рівняння 1 на доданок $\frac{\rho V}{\tau}$, отримуємо:

1. $\frac{\rho \tau}{\rho V \cdot l} = \frac{\Delta p}{\rho V_x^2} = \frac{d(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})g}{3 \cdot \rho V_x^2}$ – Еу – критерій Ейлера в Л шарі.
2. $\frac{2\pi \cdot \sigma \cdot \cos\theta \cdot \tau}{\rho V \cdot l^2} = \frac{2\pi \cdot \sigma \cdot \cos\theta \cdot \mu}{\rho V^2 \cdot l \cdot \mu} = \frac{1}{N} \cdot \frac{2\pi \cdot \sigma \cdot \cos\theta}{\mu V_x}$ – поверхневий критерій.
3. $\frac{\rho g \tau}{\rho V} = \frac{g \tau \cdot l}{V \cdot l} = \frac{g \cdot l}{V_x^2}$ – Fr – критерій Фруда в Л шарі
4. $\frac{\mu V \tau}{l^2 \rho V} = \frac{\mu}{\delta \rho V_x} = \frac{1}{\text{Re}}$ – обернений критерій Рейнольдса в Л шарі,

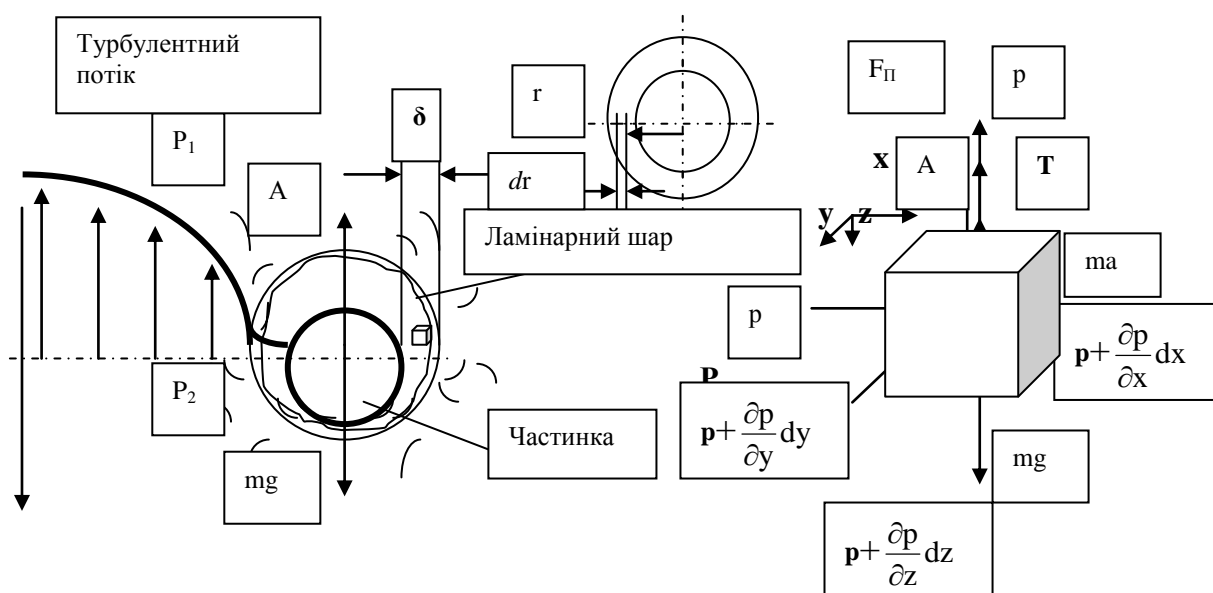


Рисунок 2 – Схема формування Л шару навколо рухомої частинки, що осаджується з Т або П режимом

де V_x – швидкість пристінних шарів рідини, що відповідає напруженню сили тертя на межі рідина – поверхня частинки, м/с; Δp – різниця тисків попереду і позаду частинки, Па; d – діаметр частинки, м.

Вираховуємо числові значення критеріїв. При цьому в критерії підставляємо характеристики для кристалів марганцевокислого калію, KMnO_4 і для води при нормальних умовах: $\rho_{\text{ч}} \approx 2100 \text{ кг/м}^3$ – густина частинок марганцевокислого калію, KMnO_4 ; $\rho_{\text{с}} \approx 1000 \text{ кг/м}^3$ – густина води при нормальних умовах; $\sigma \approx 0,0725 \text{ Н/м}$ – коефіцієнт поверхневого натягу води при нормальних умовах; $\cos\theta \approx 0,5$ – гідрофільність твердого тіла (частинки KMnO_4 , що визначалася експериментально методом цифрової фотографії; $\mu \approx 1 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ – динамічна в'язкість води при нормальних умовах; $\delta \approx 0,3 \text{ мм} \approx 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – товщина Л приграничного шару при Т рухові частинок в рідких середовищах.

Швидкість осадження твердої частинки KMnO_4 визначаємо за загальноприйнятими правилами при осадженні:

1. Критерій Архімеда для кристалів KMnO_4 у воді:

$$\text{Ar} = g d^3 (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}}) \rho_{\text{с}} / \mu^2 = 9,8 \cdot (0,9 \cdot 10^{-3})^3 (2100 - 1000) 1000 / (1 \cdot 10^{-3})^2 \approx 7858 \rightarrow \text{Перехідний (П)}$$

2. Критерій Рейнольдса Re з критеріального рівняння при осадженні для П режиму:
 $Re = 0,152 (\Psi Ar)^{0,715} = 0,152 \cdot (0,77 \cdot 7858)^{0,715} = 76,88$.

3. Швидкість осадження з критерію Рейнольдса: $V = \frac{Re \cdot \mu}{\rho r_c} = \frac{76,8 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{0,9 \cdot 10^{-3} \cdot 1000} = 0,085$ м/с.

4. Швидкість пристінних шарів рідини, що відповідає напруженню сили тертя на межі рідини – поверхня частинки $KMnO_4$: $V_x \approx V/N \approx V/10 \approx 0,085/10 \approx 0,0085$ м/с.

Розраховуємо числові значення критеріїв з пунктах 1, 2, 3, 4.

Критерій Ейлера в Л шарі:

$$1. Eu = \frac{d(\rho_{ch} - \rho_c)g}{3 \cdot \rho V_x^2} = \frac{0,9 \cdot 10^{-3} (2100 - 1000) 9,8}{3 \cdot 1000 \cdot 0,0085^2} = 44,76; 2. \frac{1}{N} \cdot \frac{2\pi \cdot \sigma \cdot \cos\theta}{\mu V_x} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,0725 \cdot 0,5}{10 \cdot 10^{-3} \cdot 0,0085} = 2678.$$

3. Сили тяжіння тобто критерій Фруда нами врахований в п. 1.

$$4. \frac{1}{Re} = \frac{\mu}{\delta \rho V_x} = \frac{10^{-3}}{0,3 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 \cdot 0,0085} = 0,392;$$

Виходячи з наведених розрахунків, в системі елементарний об'єм в Л шарі рідини, що виникає навколо подрібненої чи диспергованої частинки, яка рухається з П або Т режимом, оберненим критерієм Рейнольдса можна знехтувати, оскільки це величина, що на 3–4 порядки є меншою від критеріїв Ейлера в Л шарі та поверхневого критерію.

Аналогічно, як і в попередньому разі, зі співвідношення (1) отримуємо критеріальне рівняння (2). Нехтуємо також одиницею в критеріальному рівнянні (2). Згідно з наведених розрахунків, силами тертя, інерції в даній системі також нехтуємо, оскільки розглядаємо елементарний об'єм рідини в Л плівці, де швидкість руху в приповерхневій області навколо частинки є дуже малою і сили внутрішнього тертя практично не проявляються. Розглянемо сили тиску і сили поверхневого натягу в Л шарі, що діють на елементарне кільце рідини (рис. 2). Площа елементарного кільця:

$dS = 2\pi r dr$; Сила тиску, що діє на елементарне кільце: $dP = p 2\pi r dr$; Сила поверхневого натягу що діє в Л шарі: $dF_{\Pi} = 2\pi \sigma \cos\theta dr$.

Інтегруємо рівняння, виносячи сталі величини за знак інтегрування:

$$dP = \Delta p 2\pi \int_0^{\delta} r dr = \Delta p \pi \delta^2; \quad dF_{\Pi} = 2\pi \sigma \cos\theta \int_0^r dr,$$

де r – радіус-вектор до елементарного кільця, м.

Слід зауважити, що фізичний зміст інтегрування в даній системі полягає в тому, що товщина Л шару сумується від поверхні частинки до нескінченості, тобто коли товщина Л шару δ зростає до нескінченості. Тоді маємо граничний випадок – межу переходу потоку навколо частинки від Л до П режиму.

Після інтегрування отримуємо співвідношення: $\Delta p \pi \delta^2 = \pi \sigma \cos\theta d$.

Замість різниці тисків попереду та позаду твердої частинки підставляємо значення різниці сили тяжіння та виштовхувальної, віднесеної до площі поверхні півсфери. Скорочуючи на величину d і π , отримуємо значення товщини Л шару [3]:

$$\delta = \sqrt{\frac{9,42 \cdot \sigma \cdot \cos\theta}{g(\rho_{ch} - \rho_c)}}. \quad (9)$$

Отримана рівність 9 справедлива для критичного значення числа Рейнольдса, тобто на межі переходу від Л до П режиму. Отримане значення товщини Л шару являє собою своєрідний баланс між силами поверхневого натягу і силами тиску, що спричи-

нені різницею сил тяжіння та виштовхування. Подальше збільшення швидкості осадження призводить до зменшення товщини L шару обернено пропорційно до коефіцієнта турбулізації L шару ($K_t = Re_p / Re_{кр}$), де Re_p – робоче значення критерію Рейнольдса при осадженні; $Re_{кр}$ – критичне значення критерію Рейнольдса при осадженні ($Re_{кр} = 2$). Тоді реальне значення товщини L шару буде розраховуватися з рівності (10) [3].

$$\delta = \sqrt{\frac{9,42 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{g(\rho_q - \rho_c)}} \cdot Re_p / Re_{кр}. \quad (10)$$

Очевидно, що товщина L шару не є однакою, мінімальна – у фронтальній частині, тобто в місці набігання потоку на частинку, максимальна – позаду (рис. 2). Однак, ми розглядали усереднену картину, яка має місце у всіх фізичних підходах. Такий розгляд дав нам можливість методом комп'ютерного розрахунку та методом розмірностей вивести критерії оптимізації гравітаційного (а) та відцентрового (б) процесу екстракції (11) [9,10], за якими можна розраховувати оптимальні середні діаметри подрібнення ендокринної ферментної сировини перед процесом екстракції.

$$B = 3,076 \sqrt{\frac{(\sigma \cdot \cos \theta)^3 \cdot \rho_c^2}{\mu^4 g (\rho_q - \rho_c)}}; \quad B_{ц} = 3,076 \sqrt{\frac{(\sigma \cdot \cos \theta)^3 \cdot \rho_c^2}{\mu^4 \omega^2 r (\rho_q - \rho_c)}}, \quad (11)$$

$B, B_{ц}$ – критерії оптимізації гравітаційного та відцентрового екстрагування, відповідно; ρ_q, ρ_c – густина частинки і середовища відповідно, $кг/м^3$; σ – коефіцієнт поверхневого натягу екстрагента, $Н/м$; $\cos \theta$ – гідрофільність поверхні частинки; $g, \omega^2 r$ – прискорення вільного падіння та доцентрове, відповідно, $м/с^2$; μ – динамічна в'язкість екстрагента, $Па \cdot с$.

За допомогою критеріїв ми визначали оптимальні параметри псевдозрідженого шару (ПЗШ) в системі ТТ-Р при виробництві цілого ряду органопрепаратів а також розробили нові схеми екстракторів з ПЗШ [11–20].

Слід зауважити, що наведена концепція застосовувалася нами також для розгляду гідромеханічних процесів псевдозрідження та перемішування, оскільки силове поле, що діє на елементарний об'єм рідини в приграничному шарі на межі контакту ТТ-Р аналогічне в умовах псевдозрідження до осадження в полі гравітаційних сил, а в умовах перемішування – до осадження в полі відцентрових сил.

Оптимізація основних параметрів псевдозрідження та перемішування дає можливість суттєво інтенсифікувати дифузійні процеси, зокрема екстракцію органопрепаратів з ендокринної сировини і економити при цьому значні енергоресурси.

Література

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя: Пер. с нем. М.: Наука, 1974. – 711 с.
2. Білонога Ю.Л. Оптимізація швидкості руху рідин в трубопроводах // Хім. пром. України. – 1999. – №5. – С.33–35.
3. Білонога Ю.Л. До питання турбулентного осадження диспергованих частинок в суцільному середовищі // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2002. – №1 – С. 71–74.
4. Кук Г.А. Процессы и аппараты молочной промышленности. – М.: Пищевая промышленность, 1973. – 767 с.
5. Білонога Ю.Л., Максисько О.Р., Ціж Б.Р., Варивода Ю.Ю. Підвищення коефіцієнта теплопередачі теплообмінної апаратури при використанні ПАР. // Науковий віс-

ник Львівської національної академії ветеринарної медицини імені С.З. Гжицького.– 2004.– Т.6 (№2).–Ч.3.–С. 126–131.

6. Угинчус А.А. Гидравлика и гидромашины: Учебник.– Харьков.– Издательство Харьковского госуниверситета им. А.М. Горького, 1960. – 858 с.

7. Білонога Ю.Л., Максисько О.Р., Ціж Б.Р., Варивода Ю.Ю. До питання розрахунку коефіцієнта теплопередачі теплообмінної апаратури // Науковий вісник ЛНАВМ ім.С.З. Гжицького. –2005. – Т.7, (№.2), Частина 6. – С. 3–7.

8. Білонога Ю.Л., Максисько О.Р. Підвищення коефіцієнта теплопередачі кожухотрубного теплообмінника при тепловій обробці молока // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2005.– Випуск 38. – С.82–87.

9. Білонога Ю.Л. Оптимізація параметрів подрібнення твердої сировини під час розчинення та екстракції в полі гравітаційних або відцентрових сил // Вісник НУ “Львівська політехніка” Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2004. – № 481.– С. 104–116.

10. Білонога Ю.Л., Білонога Д.М. Критерій оптимізації гравітаційного процесу екстракції в системі тверде тіло-рідина або рідина-рідина // Вісник НУ “Львівська політехніка” Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2003. – № 480.– С. 3–6.

11. Пат. № 53421 Україна, МПК 7А61К38/00, С07К1/00, Спосіб екстракції інсуліну з підшлункової залози забійної худоби / Білонога Ю.Л., Занічковська Л.В.– Опубл. 15.01.2003, Бюл.№1.

12. Пат. № 62393 Україна, МПК 7С07Н19/20, Спосіб виробництва аденозинтрифосфорної кислоти / Кравців Р.Й., Білонога Ю.Л., Занічковська Л.В.– Опубл. 15.12.2003 р. Бюл. №12.

13. Пат. № 63580 Україна, МПК 7А61К38/00, А61К35/39, Спосіб екстракції панкреатину з підшлункової залози забійних тварин / Кравців Р.Й., Білонога Ю.Л., Занічковська Л.В. – Опубл. 15.01.2004 р. Бюл. №1.

14. Пат. № 64364 Україна, МПК 7А61К38/00, Спосіб екстракції адренокортикотропного гормону / Кравців Р.Й., Білонога Ю.Л., Занічковська Л.В. – Опубл. 16.02.2004 р. Бюл. №2.

15. Кравців Р.Й., Білонога Ю.Л., Занічковська Л.В. Спосіб виробництва хонсуриду з хрящів, трахеї і носа забійних тварин. Заявка № 20040403003 від 22.04.04.

16. Кравців Р.Й., Білонога Ю.Л., Занічковська Л.В. Спосіб виробництва спленіну. Заявка № 20040503493 від 11.05.04.

17. Пат. № 56795 Україна, МПК 7А61К38/17, С07К1/00, Пристрій для інтенсифікації перебігу дифузійних процесів в системі тверде тіло-рідина, наприклад, інтенсифікації екстракції інсуліну з підшлункової залози забійних тварин / Кравців Р.Й., Білонога Ю.Л., Занічковська Л.В. – Опубл. 15.05.2003 р. Бюл. №5.

18. Білонога Ю.Л., Білонога Д.М. Оптимальні параметри подрібнення сировини при виробництві інсуліну з використанням псевдозріженого шару // Науковий вісник ЛДАВМ ім.С.З.Гжицького. – 2003. – Т.5, №.2, Частина 1. – С. 115–119.

19. Білонога Ю.Л. Оптимальні параметри подрібнення сировини при виробництві адренокортикотропного гормону (АКТГ) з використанням псевдозріженого шару // Науковий вісник ЛНАВМ ім.С.З. Гжицького. – 2003. – Т.5, №.4. – С. 3–7.

20. Білонога Ю.Л., Пашечко М.І., Ціж Б.Р. Оптимізація параметрів псевдозріженого шару в системі тверде тіло – рідина // Холодильна техніка і технологія.– 2005.– №1.– С. 69–76.